

УДК 539.172.8

ФОТО- И ЭЛЕКТРОДЕЛЕНИЕ ЯДЕР ВОЛЬФРАМА В ОРИЕНТИРОВАННОМ МОНОКРИСТАЛЛЕ

В.И. Касилов

ИФВЭЯФ ННЦ ХФТИ

ул. Академическая 1, г. Харьков, 61108, Украина

e-mail: kasilovvi@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 28 апреля 2011 г.

Рассмотрена возможность использования реакций фото- и электроделения ядер вольфрама как инструмента для исследования динамики и процессов излучения ультрарелятивистских электронов в ориентированном монокристалле. С этой целью проведен анализ экспериментальных данных по исследованию ориентационных зависимостей выходов осколков фото- и электроделения ядер из монокристаллического вольфрама при взаимодействии электронов с энергией 1200 МэВ. Рассмотрена модель монокристалла, представленного в виде сэндвича, состоящего из двух приповерхностных слоев, на входе пучка электронов в монокристалл и на выходе из него, из которых вылетают осколки деления под действием фотонов и электронов, а между ними радиатор тормозного излучения, представляющий собой часть монокристалла из которой осколки деления не выходят из-за их малой длины пробега в данном материале. Исходя из этой модели монокристалла рассчитано отношение выходов осколков фотоделения к сечению электроделения и построена зависимость этого отношения от угла ориентации кристаллографической оси относительно направления падающего на монокристалл пучка ультрарелятивистских электронов. На основании полученной зависимости сделан вывод о перераспределении потоков каналированных и надбарьерных частиц в кристалле в интервале углов поворота кристаллографической оси относительно направления падающего пучка в пределах от 0 до 2 миллирадиан. Сделан также вывод о том, что спектр тормозного излучения в этом интервале углов также меняется, а именно, при повороте кристалла в пределах углов от 0 до 1 миллирадиана он становится более жестким, а при больших углах разориентации, когда кристалл становится эквивалентен аморфной мишени, спектр тормозного излучения становится близким к шиффовскому.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пучок электронов, каналирование, ориентационная зависимость, динамика, надбарьерное излучение.

PHOTO- AND ELECTROFISSION OF TUNGSTEN NUCLEY IN THE ORIENTED SINGLE CRYSTAL

V.I. Kasilov

Institute of High Energy and Nuclear Physics, National Science Centre of Physics and Technology

Akademicheskaya str.1, Kharkov, Ukraine, 61108

The paper is concerned with the possibility of using the reactions of photo- and electro-fission of tungsten nuclei as tools to investigate the dynamics of ultrarelativistic electron radiation processes in the oriented single crystal. For this purpose, analysis has been made of the experimental data for orientation dependences of the yields of photo- and electro- fission fragments from single-crystal tungsten in the interaction of 1200 MeV electrons. Consideration has been given to the model of a single crystal represented as a sandwich consisting of two near-surface layers being at the electron beam input into the single crystal and at the crystal output. The fission fragments escape from the layers under the action of photons and electrons. Between the layers, there is the bremsstrahlung radiator representing a part of the single crystal, from which the fission fragments cannot escape because of their short path lengths in the given material. On the basis of the model, the ratio of photofission fragment yields to the electrofission cross-section has been calculated. The resulting ratio has been plotted as a function of the crystal axis orientation angle relative to the direction of the ultrarelativistic electron beam incident on the single crystal. Based on the function, the conclusion has been made about redistribution of channeled and above-barrier particle fluxes in the crystal in the (0–2) mrad range of angles of crystal axis rotation relative to the incident beam direction. It has been also concluded that the bremsstrahlung spectrum in the given angular range also varies, i.e., with crystal rotation in the (0-1) mrad angular range it becomes harder; while at larger angles of disorientation when the crystal becomes equivalent to an amorphous target, the bremsstrahlung spectrum becomes closer to the Schiff spectrum.

KEYWORDS: electron beam, channeling, orientation dependence, dynamics, over-barrier emission

ФОТО- ТА ЕЛЕКТРОПОДІЛ ЯДЕР ВОЛЬФРАМУ В ОРІЄНТОВАНОМУ МОНОКРИСТАЛІ

В.І. Касілов

ІФВЕЯФ ННЦ ХФТИ

вул. Академічна 1, м. Харків, 61108, Україна

Розглянуто можливість використання реакцій фото-і електроподілу ядер вольфраму як інструменту для дослідження динаміки та процесів випромінювання ультрарелятивістських електронів в орієнтованому монокристалі. З цієї метою проведено аналіз експериментальних даних з дослідження орієнтаційних залежностей виходів уламків фото- та електроподілу ядер з монокристалічного вольфраму під час взаємодії електронів з енергією 1200 Мев. Розглянуто модель монокристалу: сендвіч, що складається з двох приповерхневих шарів, на вході та на виході пучка електронів з монокристалу, з яких вилітають уламки поділу під дією фотонів та електронів. Між ними радіатор гальмівного випромінювання, що представляє собою частину монокристала з якої уламки поділу не виходять через їх малу довжину пробігу в даному матеріалі. Виходячи з цієї моделі монокристала розраховано відношення виходів уламків фотоподілу до перерізу електроподілу і побудована залежність цього відношення від кута орієнтації кристаллографічної осі щодо напрямку

пучка ультрарелятивистских электронов, что падает на монокристалл. На подставе отриманої залежності зроблено висновок про перерозподіл потоків каналюваних і надбар'єрних частинок в кристалі в інтервалі кутів повороту кристаллографічної осі щодо напрямку пучка в межах від 0 до 2 мілірадіан. Зроблено також висновок про те, що спектр гальмівного випромінювання в цьому інтервалі кутів також змінюється, а саме, при повороті кристала в межах кутів від 0 до 1 мілірадіана він стає більш жорстким, а при великих кутах розорієнтації, коли кристал стає еквівалентний аморфній мішені, спектр гальмівного випромінювання стає близьким до шіффовського.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: пучок електронів, каналювання, орієнтаційна залежність, динаміка, надбар'єрне випромінювання

Экспериментальное открытие явления каналирования релятивистских позитронов при прохождении пучков ускоренных частиц через ориентированные кристаллы [1] предшествовало новому направлению в физике взаимодействия частиц высоких энергий с веществом, которое характеризуется существенным влиянием динамики пучка релятивистских заряженных частиц в веществе на сопровождающие электродинамические процессы. К таким процессам в первую очередь относится когерентное рассеяние на цепочках атомов кристалла, тормозное излучение релятивистских каналированных и надбарьерных электронов и позитронов, электро- и фотоядерные реакции и др.

Прохождение ультрарелятивистских электронов через монокристалл вдоль одной из кристаллографических осей может сопровождаться явлением каналирования и надбарьерного движения частиц [2-6]. Вследствие рассеяния на атомах решетки происходит перераспределение между этими группами частиц. Эффективность взаимодействия каналированных и надбарьерных частиц с атомами решетки существенно различается, поэтому необходимо знать соотношение между этими группами частиц с глубиной их проникновения в кристалл. Исследование распределения каналированных частиц с глубиной проникновения в кристалл, угловых распределений гамма-излучения электронов высоких энергий в монокристаллах наряду с данными о рассеянии может дать важные сведения о динамике частиц и процессах их излучения.

При движении быстрой заряженной частицы в кристалле под малым углом к одной из кристаллографических осей она последовательно сталкивается с различными цепочками атомов, расположенными параллельно этой оси. При этом движение частицы в кристалле может быть как регулярным, так и стохастическим, причем стохастизация движения может быть обусловлена как действием на частицу в кристалле случайных сил, связанных, например, с тепловыми колебаниями атомов и дефектами кристаллической решетки, так и явлением динамического хаоса при прохождении быстрых частиц через кристалл, когда на частицу не действуют случайные силы [7, 8].

Целью настоящей работы является использование фото- и электроядерных реакций как инструмента для исследования динамики и процессов излучения ультрарелятивистских электронов в ориентированном монокристалле. Рассматривается возможность использования реакций фото – и электроделения ядер вольфрама, как инструмента для исследования динамики и процессов излучения ультрарелятивистских электронов в ориентированном монокристалле.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый эксперимент, в котором использовались фото- и электроядерные реакции, был направлен на измерения выходов осколков при делении ядер монокристалла вольфрама [9]. Эксперимент проводился на пучке электронов ЛУЭ 2 ГэВ. Пучок электронов с энергией 1200 МэВ и расходимостью 0,2 миллирадиана направлялся на монокристалл вольфрама, расположенный в вакуумной камере гониометра. Кристалл был изготовлен в виде пластинки с толщиной 1 мм, геометрическая плоскость которой составляла угол около трех градусов с кристаллографической плоскостью $\langle 111 \rangle$. Ориентирование кристалла относительно направления пучка электронов проводилось таким образом, что ось кристалла $\langle 111 \rangle$ направлялась вдоль оси пучка. Ориентационные зависимости выхода осколков деления ядер монокристаллического вольфрама измерялись при ориентациях, устанавливаемых вращением кристалла вокруг оси перпендикулярной направлению пучка электронов. Осколки деления регистрировались майларовой пленкой, изготовленной в виде ленты, которая передвигалась с помощью лентопотяжного устройства, установленного в вакуумной камере гониометра. Это устройство имело окна, через которые осколки, вылетающие из монокристалла под углами 22 и 158 градусов к направлению пучка на расстоянии 50 мм от монокристалла попадали на майларовую пленку. Пленка устанавливалась так, чтобы осколки внедрялись в нее под углом 20 градусов относительно ее поверхности и образовывали продолговатые треки, как это было продемонстрировано в работе [10]. Идентификация осколков деления осуществлялась по трекам, образованным в майларе, которые просматривались под микроскопом МБИ-3 после травления пленки в растворе КОН. Поскольку в этом эксперименте использовался монокристалл вольфрама толщина которого 1 мм, а осколки деления имеют пробег в материале вольфрама всего около 3 мкм, следовательно осколки деления выходят из кристалла только с приповерхностных слоев, толщина которых составляет около 3 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений ориентационных зависимостей выходов осколков фото- и электроделения монокристаллического вольфрама представлены на рис.1. Верхняя кривая представляет ориентационную

зависимость выхода осколков фотоделения ядер, нижняя ориентационную зависимость выхода осколков от процесса электроделения. Как видно из рисунка характер ориентационных зависимостей для фотоделения и электроделения имеет некоторое различие в пределах углов поворота кристалла от 0 до 3 миллирадиана. Различие заключается в том, что выход осколков от процесса фотоделения достигает своего минимума при повороте кристалла на угол 1,5 миллирадиана, в то время как от процесса электроделения минимум выхода осколков достигается при угле поворота кристалла равном 1 миллирадиану. При этом выход осколков фотоделения уменьшается в 1,6 раза, в то время как выход осколков от процесса электроделения уменьшается в 2,1 раза. Вероятнее всего это связано с тем, что электроны, падающие на монокристалл, захватываются в режим каналирования при ориентации кристаллографической оси, совпадающей с направлением падающего пучка, и при этом с высокой вероятностью взаимодействуют с ядрами монокристалла. В результате процесс электроделения происходит с максимальным выходом осколков за счет того, что плотность упаковки ядер вдоль кристаллографической оси существенно выше.

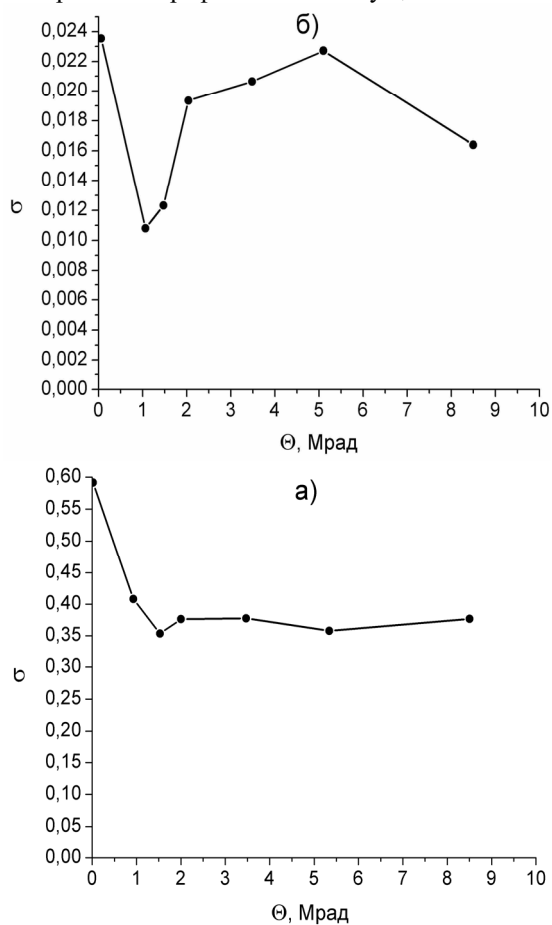


Рис. 1. Ориентационная зависимость выхода осколков деления.
а) фотонами и электронами; б) электронами.

прошедшие через монокристалл и попавшие во второй приповерхностный слой, также будут образовывать в нем осколки за счет процесса электроделения. Таким образом во втором приповерхностном слое мы будем иметь осколки как за счет процесса электроделения, так и за счет процесса фотоделения. Однако следует заметить, что сечение процесса электроделения на два порядка меньше чем процесса фотоделения, поэтому выход осколков от процесса электроделения во втором приповерхностном слое монокристалла вольфрама по сравнению с выходом осколков от процесса фотоделения будет незначительным.

Как видно из экспериментальных данных работы [9] эти выходы отличаются примерно в сорок раз. Исходя из представленной модели монокристалла вольфрама получим отношение числа осколков от процесса фотоделения к числу осколков от процесса электроделения. Легко убедиться, что выход реакции деления на электрон и на ядро-мишень в зависимости от длины тормозного пути, выраженной в радиационных единицах, имеет вид

$$\gamma(E_0, \Delta t) = \sigma_{ef} + \sigma_{of} \Delta t$$

$$\Delta t = n_\phi$$
(1)

При повороте монокристалла относительно направления падающего пучка на небольшой угол, в пределах одного миллирадиана, электроны выходят из режима каналирования, и вероятность их взаимодействия с ядрами монокристалла уменьшается, что приводит к уменьшению выхода осколков от процесса электроделения, достигая минимума при повороте монокристалла на угол 1 миллирадиан. Заметим, что кристаллографическая ось $\langle 111 \rangle$, повернутая относительно направления падающего пучка электронов на угол более пяти миллирадиан, практически соответствует полностью разориентированному кристаллу. При этом электроны, проходящие через монокристалл, взаимодействуют с ним как с аморфной мишенью и излучают тормозные фотоны со спектром близким к шиффовскому.

Для дальнейших рассуждений представим монокристалл вольфрама в виде сэндвича, изображенного на рис.2, состоящего из двух приповерхностных слоев толщиной около трех микрон каждый, а между ними радиатор тормозного излучения, в качестве которого служит материал данного монокристалла. При прохождении такого сэндвича пучок электронов взаимодействует с первым на своем пути приповерхностным слоем, в котором образуются осколки в результате процесса электроделения монокристаллического вольфрама. При дальнейшем прохождении пучка через монокристалл электроны образуют тормозной пучок гамма-излучения в материале кристалла, который взаимодействует со вторым приповерхностным слоем монокристалла и образует в нем осколки за счет процесса фотоделения ядер монокристаллического вольфрама. Кроме того первичные электроны,

Здесь E_0 — энергия электрона, σ_{ef} — сечение электроделения, σ_{Qf} — выход фотоделения на эквивалентный фотон, Δt — тормозной путь электрона, выраженный в радиационных единицах, n_Q — количество эквивалентных γ -квантов.

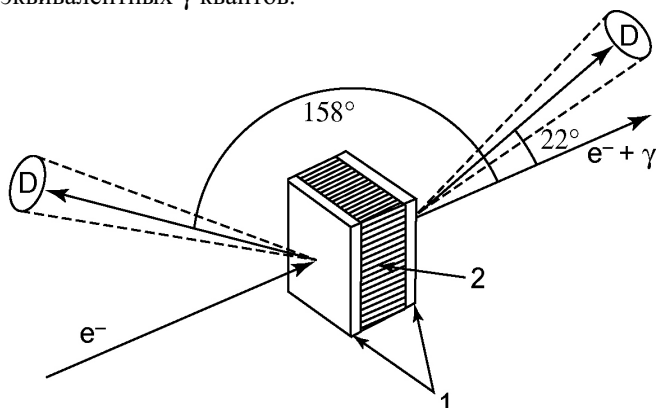


Рис.2. Модель кристалла-сэндвича.
1 — приповерхностные слои; 2 — радиатор тормозного излучения; D — детекторы осколков деления.

миллирадиан наблюдается сильное изменение величины отношения числа осколков от процесса фотоделения к числу осколков от процесса электроделения. Это, вероятнее всего, связано с перераспределением потоков каналированных и надбарьерных электронов, которые при разных ориентациях кристаллографической оси в пределах углов от 0 до 1,5 миллирадиана относительно направления, падающего на монокристалл первичного пучка, излучают разные спектры фотонов.

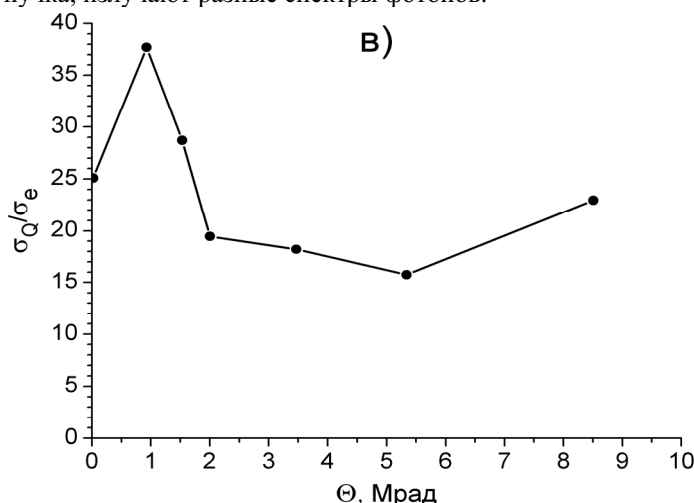


Рис. 3. Ориентационная зависимость отношения выходов осколков фотоделения к сечению электроделения.

электронов, сильно обогащается фотонами, энергия которых ниже порога деления ядер вольфрама, в результате чего количество фотонов возрастает, а выход осколков фотоделения уменьшается. По мере разориентации кристаллографической оси относительно направления первичного пучка электронов спектр фотонов с энергией выше порога фотоделения становится более жестким за счет обогащения фотонами, которые могут быть обусловлены процессом когерентного тормозного излучения электронов, а это, в свою очередь, приводит к увеличению выхода осколков от процесса фотоделения.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного анализа экспериментальных данных ориентационной зависимости выхода осколков деления ядер из монокристалла вольфрама, получена ориентационная зависимость отношения выхода осколков фотоделения к сечению электроделения. На основании полученной зависимости сделан вывод о перераспределении потоков каналированных и надбарьерных частиц в кристалле в интервале углов поворота кристаллографической оси относительно направления падающего пучка в пределах от 0 до 2 миллирадиан. Сделан также вывод о том, что спектр тормозного излучения в этом интервале углов также меняется, а именно, при повороте кристалла в пределах углов от 0 до 1 миллирадиана он становится более жестким, а при больших углах разориентации, когда кристалл становится эквивалентен аморфной мишени, спектр тормозного

Формула для отношения выхода фотоделения к сечению электроделения имеет вид

$$\frac{\sigma_Q}{\sigma_e} = \frac{Y_1 - Y_2}{\Delta t Y_2}. \quad (2)$$

Было вычислено отношение выхода осколков фотоделения к сечению электроделения по формуле (2), взятой из работ [11, 12]. Это отношение получилось равным 25, что не противоречит данным, которые были получены для целого ряда других ядер в энергетическом интервале выше 30 МэВ. Результаты вычислений отношения выходов фотоделения к сечению электроделения представлены на рис. 3. При ориентациях кристаллографической оси в интервале углов поворота кристалла от 0 до 2

Заметим, что порог фото- и электроделения ядер вольфрама около 40 МэВ, отношение числа осколков от процесса фотоделения к числу осколков от процесса электроделения, в некотором смысле, характеризует спектральный состав гамма-излучения электронов при разных ориентациях кристаллографической оси относительно направления первичного пучка электронов. Видно, что когда кристаллографическая ось совпадает с направлением падающего на монокристалл пучка электронов, число осколков от процесса электроделения возрастает, а отношение числа осколков от процесса фотоделения к числу осколков от процесса электроделения, уменьшается. Это свидетельствует о том, что спектр фотонов при этой ориентации кристаллографической оси относительно направления первичного пучка

излучения становится близким к шиффовскому.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.L. Morohovskij i dr. Kanalirovanie pozitronov s energiej 1 GeV // Pis'ma v ZhETF. – 1972. – T.16, № 3. – S.162.
2. M.L. Ter-Mikaelian. High Energy Electrodynamics in Condensed Media. – New York: Wiley, 1972.
3. А.И. Ахиезер, Н.Ф. Шульга Излучение релятивистских частиц в монокристаллах // УФН. - 1982. - Т.137. - С.561.
4. A.I. Akhiezer, N.F. Shulga High-energy electrodynamics. - Amsterdam: Gordon and Breach, 1996.
5. V.B. Ganenko et. al. Radiation of relativistic electrons in crystals moving along crystal axis and planes // Ukr. Phys. Journal. – 1983. - Vol.28. – P.301-304.
6. А.Р. Antipenko, V.F. Boldyshev, V.I Kasilov i dr. Issledovanie effekta dekanalirovanija po vyhodu elektrojadernyh reakcij pri aksial'nom kanalirovanii reljativistskih elektronov // DAN SSSR. – 1986. – Т. 291, №3. – С. 589-591.
7. Ju.L. Bolotin, V.Ju. Gonchar, V.I. Truten', N.F. Shul'ga // Ukrainskij fizicheskij zhurnal. – 1986. - T.31. - C.14.
8. A.I. Ahiezer, N.F. Shul'ga // UFN. - 1987. - T.151. - C.385.
9. А.Р. Antinenko, I.A. Grishaev, V.I. Kasilov i dr. Orientacionnaja zavisimost' vyhoda oskolkov delenija jader iz monokristalla vol'frama // Pis'ma v ZhETF. – 1979. - T.29, Vyp.1. - C.86-88.
10. V.I. Kasilov, A.V. Mitrofanova, Ju.N. Ranjuk, P.V. Sorokin // Ukrainskij fizicheskij zhurnal. – 1971. - T.15, Vyp.3. - C.486.
11. Ju.N. Ranjuk, P.V. Sorokin Delenie urana elektronami v intervale energij ot 35 do 260 MeV // Jadernaja fizika. – 1967. – Т.5, №3. – С.531.
12. V.I. Noga, Ju.N. Ranjuk, P.V. Sorokin Sechenie reakcij $C^{12} \rightarrow C^{11}$, $Cu^{63} \rightarrow Cu^{62}$, $Al^{27} \rightarrow Na^{24}$, $Si^{28} \rightarrow Na^{24}$, $Cu^{63} \rightarrow Co^{58}$ pod dejstviem γ -kvantov i elektronov s energiej do 260 MeV // Ukrainskij fizicheskij zhurnal. – 1968. - T.13, №12. - C. 2003-2007.